

CÓDIGO: 3.2.13

ARGAMASSAS DE REABILITAÇÃO COM RESÍDUOS DE CERÂMICA

Matias, Gina¹, Torres, Isabel², Faria, Paulina³

1: ITeCons - Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção

E-mail: ginamatias@itecons.uc.pt, web: <http://www.itecons.uc.pt/>

2: Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade de Coimbra

E-mail: itorres@dec.uc.pt, web: <http://www.uc.pt/fctuc/dec>

3: Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade Nova de Lisboa

E-mail: paulina.faria@fct.unl.pt, web: <http://www.dec.fct.unl.pt/>

PALAVRAS-CHAVE: Argamassas de substituição, cal, resíduos de cerâmica, caracterização, otimização.

RESUMO

A ação do tempo e dos agentes climáticos faz-se sentir de uma forma muito particular nos revestimentos exteriores, e em especial nas argamassas de revestimento, fazendo com que estes sejam normalmente os primeiros elementos a degradar-se e necessitar de reabilitação. Tendo também em conta a função de proteção que lhes é exigida facilmente se compreende a importância da execução de uma boa conservação/reabilitação.

A urgência em solucionar problemas que se arrastam no tempo e continuam a degradar as paredes leva, muitas vezes, a intervenções menos corretas com soluções inadequadas que, em vez de se revelarem a solução do problema, o vêm agravar.

Os rebocos antigos eram, essencialmente, rebocos à base de cal aérea e a sua reabilitação/substituição deve ser executada com argamassas compatíveis, para que, não só se restitua a função protetora, como também se mantenha a integridade do conjunto parede-reboco e a imagem do edificado. Os revestimentos que demonstram maior compatibilidade com este tipo de revestimento são os rebocos à base de cal aérea e de cal hidráulica natural.

Como é conhecido, muitos rebocos antigos tinham, integrados na sua composição, resíduos de cerâmica em grande quantidade, nomeadamente em Portugal, Espanha e outros países latinos. Assim, numa tentativa de conjugar o interesse da reutilização dos resíduos de cerâmica, reduzindo as quantidades que são normalmente depositadas em aterro, com os benefícios técnicos que os mesmos podem trazer às argamassas de substituição/reabilitação, tem sido desenvolvida investigação experimental na Universidade de Coimbra, em colaboração com a Universidade Nova de Lisboa, acerca do comportamento de argamassas de cal com incorporação de resíduos cerâmicos.

Neste artigo pretendem-se apresentar os desenvolvimentos mais recentes sobre a caracterização experimental destas argamassas.

1. INTRODUÇÃO

Os primeiros dados recolhidos da aplicação de argamassas de cal com argilas remontam a 3000 A.C. pelos Babilónios e, posteriormente, pelos Fenícios [1,2]. É, contudo, durante o Império Romano que este tipo de argamassas passa a ser amplamente utilizado e difundido por toda a Europa, Ásia e África, com registos documentados por Catone e Vitruvius [2]. Na ausência de pozolanas naturais, as propriedades das argamassas de cal eram melhoradas pela adição de cerâmica em pó e, noutros casos, eram adicionados grânulos de cerâmica em substituição do agregado comum. Este tipo de adições conferia às argamassas propriedades hidráulicas e alguma capacidade de impermeabilização. É possível observar, ainda hoje, em vários sítios arqueológicos, vestígios deste tipo de argamassas, como são os casos das ruínas de Conímbriga e de Tróia, em Portugal [3] e noutros locais como Índia, Grécia e Turquia [4]. Por este motivo é possível concluir que este tipo de argamassas apresentam um desempenho e durabilidade elevadas, pelo que se torna evidente o interesse em conhecer detalhadamente as suas características. Só assim será possível reproduzir argamassas semelhantes, com os meios atualmente disponíveis.

Segundo o relatório de desperdícios da indústria cerâmica da Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro [5], 96% dos resíduos produzidos são provenientes do processo produtivo essencialmente das indústrias de tijolos, ladrilhos e telhas, sendo que 37 % destes correspondem a cacos cozidos que usualmente são depositados em aterro, sem lhes ser dado qualquer uso.

O trabalho apresentado visa analisar a viabilidade da introdução de materiais provenientes da indústria cerâmica em argamassas de cal a fim de lhes melhorar o desempenho quando aplicadas em edifícios antigos. Para o efeito, foram produzidas argamassas de cal aérea hidratada em pó, com resíduos de cerâmica de diversas origens (tijolos, telhas e vasos decorativos), sujeitos a moagem simples prévia. Estes resíduos foram introduzidos na sua forma integral (fase granular e em pó) e apenas em pó, em argamassas de traço 1:3, em volume. No primeiro caso, os resíduos foram introduzidos em substituição parcial do agregado comum, e no segundo caso foram introduzidos em substituição parcial do ligante. Incorporado em granulometria fina, o material cerâmico poderá apresentar potencial pozolânico, melhorando as características das argamassas comuns de cal aérea e, simultaneamente, poderá conferir-lhes propriedades hidráulicas [6]. Assim, existe a possibilidade de reduzir a quantidade de ligante necessária e, consequentemente, as emissões poluentes e o consumo energético e de recursos implicados na sua produção. Sob a forma granular e em substituição parcial dos agregados mais comuns, o uso de resíduos cerâmicos moídos permitirá a redução do recurso a agregados naturais, com consequências ambientais nefastas e, deste modo, evitar a deposição em aterro de volumes consideráveis de materiais não aproveitados. A solução estudada apresentará vantagens, quer do ponto de vista técnico, quer do ponto de vista da sustentabilidade.

2. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Caracterização dos materiais

No âmbito do trabalho desenvolvido, foram produzidas e caracterizadas argamassas de cal aérea com três resíduos cerâmicos. Para o efeito, foram utilizados resíduos de tijolos (B - brick), de telhas (T - tile) e de vasos (P - pot), integrados nas argamassas diretamente após moagem, em substituição parcial do volume do agregado corrente, nas percentagens de 20% (L - low) e de 40% (H - high). Foram ainda produzidas argamassas com os mesmos resíduos em granulometria fina, ou seja, considerando apenas a fração fina passada no peneiro 0.075mm resultante da moagem (DB - pó de tijolo, DT - pó de telha e DP - Pó de vasos). Neste caso, os resíduos foram introduzidos em substituição parcial do ligante que foi, para o efeito, substituído nas percentagens de 10% e 20% (respectivamente LD e HD). Utilizou-se como agregado corrente uma areia de rio e como ligante uma cal aérea em pó (Lusical H100), classificada como CL90, de acordo com a NP EN 459-1: 2011. A granulometria resultante, determinada conforme o descrito pela norma NP EN 933-1:2000, é a apresentada na Figura 1, para os diferentes tipos de resíduos e para a areia de rio utilizada.

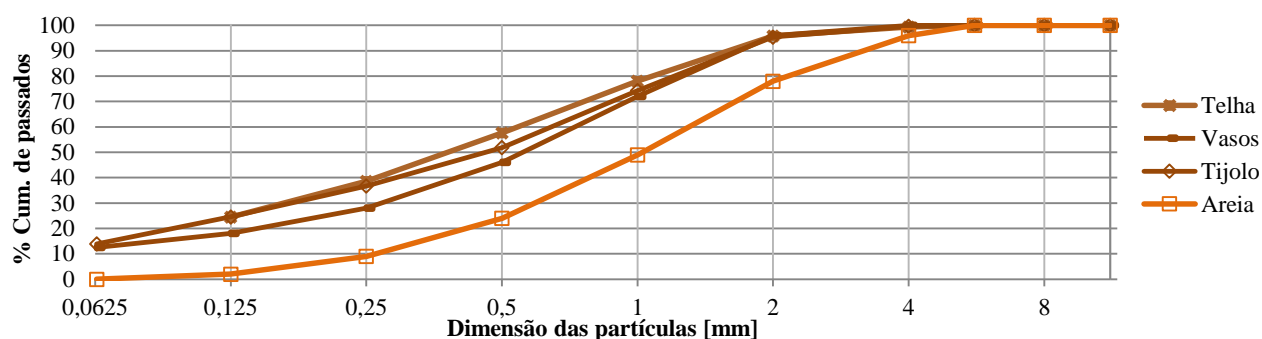


Figura 1: Distribuição granulométrica dos resíduos na forma integral e da areia

Verifica-se que a distribuição granulométrica dos resíduos após moagem é bastante similar à areia de rio. Contudo, os resíduos apresentam uma percentagem de material inferior a 0,063mm superior à registada pela areia, em cerca de 10%.

Para possibilitar o doseamento dos materiais em massa durante a preparação das diferentes misturas, determinou-se a baridade de todos os materiais de acordo com a norma NP EN 1097-3:2002. Os resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Baridade média dos materiais utilizados

Material	Areia	Cal aérea	B	T	P	DB	DT	DP
Baridade média [g/cm ³]	1,540	0,361	1,099	1,173	0,991	0,705	0,792	0,679

Verifica-se, da análise dos valores obtidos para as baridades, que a areia apresenta o valor mais elevado e a cal aérea o valor mais baixo. É possível também observar que os resíduos na sua forma integral revelam uma baridade consideravelmente superior face à sua fração fina.

Na Tabela 2 são apresentadas as composições das argamassas preparadas.

Tabela 2: Proporções utilizadas na preparação das misturas

Designação	Cal aérea	B	T	P	DB	DT	DP	Areia	Traço Volumétrico (cal:resíduo:areia)	Traço Ponderal (cal:resíduo:areia)
R	1	-	-	-	-	-	-	3	1:3	1:12.2
LB	1	0.6	-	-	-	-	-	2.4	1:0.6:2.4	1:1.8:10.2
HB	1	1.2	-	-	-	-	-	1.8	1:1.2:1.8	1:3.6:7.7
LT	1	-	0.6	-	-	-	-	2.4	1:0.6:2.4	1:1.9:10.2
HT	1	-	1.2	-	-	-	-	1.8	1:1.2:1.8	1:3.9:7.7
LP	1	-	-	0.6	-	-	-	2.4	1:0.6:2.4	1:1.9:10.2
HP	1	-	-	1.2	-	-	-	1.8	1:1.2:1.8	1:3.9:7.7
LDB	1	-	-	-	0.1	-	-	3.3	1:0.1:3.3	1:0.2:6.2
HDB	1	-	-	-	0.3	-	-	3.8	1:0.3:3.8	1:0.6:7.2
LDT	1	-	-	-	-	0.1	-	3.3	1:0.1:3.3	1:0.2:6.2
HDT	1	-	-	-	-	0.3	-	3.8	1:0.3:3.8	1:0.7:7.2
LDP	1	-	-	-	-	-	0.1	3.3	1:0.1:3.3	1:0.2:6.2
HDP	1	-	-	-	-	-	0.3	3.8	1:0.3:3.8	1:0.6:7.2

2.2 Caracterização das argamassas no estado fresco

Na Figura 2 apresenta-se a quantidade de água utilizada na preparação de cada argamassa, sob a forma da relação água/ligante, bem como o valor do espalhamento obtido, que se pretendeu que fosse $150\text{mm} \pm 15\text{mm}$.

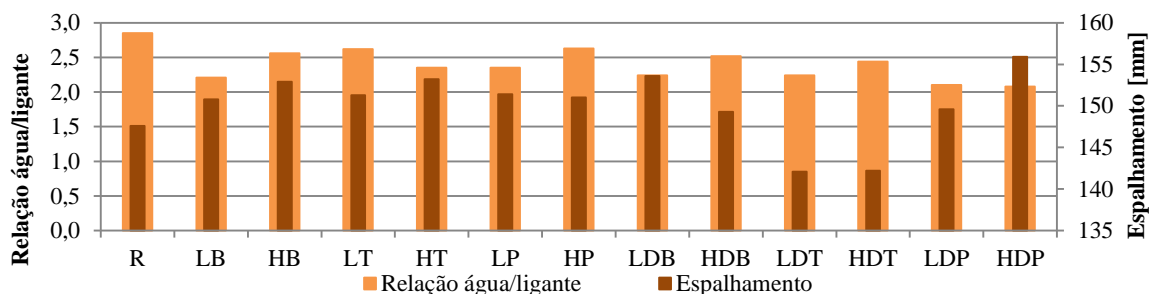


Figura 2: Relação água/ligante e espalhamento das argamassas preparadas

Verifica-se que as argamassas com resíduo na forma integral necessitam de uma quantidade superior de água para atingirem um espalhamento similar ao da argamassa de referência (R). No caso das argamassas que contêm apenas pó de resíduos, a quantidade de água não se revelou determinante, exceto no caso do pó de telha, em que, para uma relação água/ligante similar às restantes, o espalhamento obtido é consideravelmente inferior. Este aspecto poderá revelar uma potencial capacidade de absorção de água por parte do resíduo de telha na forma de pó no estado fresco, que não se regista no resíduo na forma integral. Os restantes resíduos têm um comportamento bastante similar.

Após preparação e moldagem das argamassas, estas foram mantidas nos moldes durante 7 dias consecutivos, a uma temperatura de $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$. Nos primeiros 5 dias, foram expostos a uma humidade relativa de $(95 \pm 5)\%$ e nos restantes 2 dias a humidade relativa passou a ser de $(65 \pm 5)\%$. Estas condições foram mantidas após desmoldagem e até à data de ensaio.

2.3 Caracterização das argamassas no estado endurecido

Resistência à flexão e resistência à compressão

A resistência à compressão foi determinada de acordo com a norma de ensaio EN 1015-11:1999/A1:2006. Foram realizados ensaios aos 60 e aos 120 dias. Na Figura 3 são apresentados os resultados obtidos, bem como os respectivos desvios-padrão.

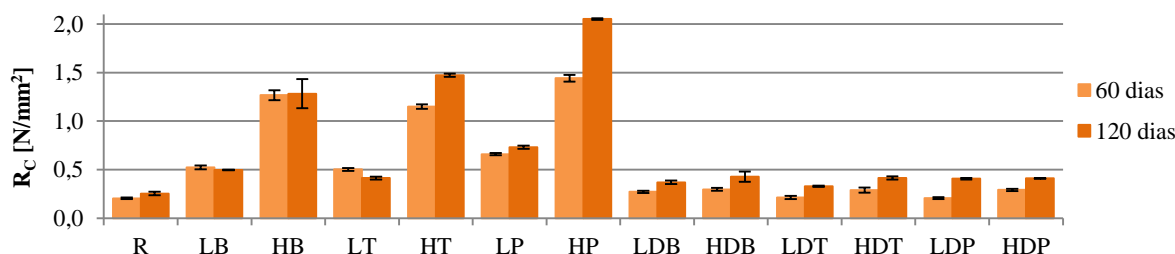


Figura 3: Resistência à compressão (R_c) aos 60 e aos 120 dias

No caso particular das argamassas com resíduo integral, verificou-se que as argamassas com percentagem de substituição mais elevada obtiveram valores de resistências à compressão significativamente mais elevadas e que estas aumentaram ao longo do período de cura. No caso das argamassas com pó de

resíduos, verificou-se que, apesar de os valores obtidos serem consideravelmente mais baixos que os das argamassas com resíduos na forma integral (substituição da cal aérea), as argamassas com percentagens superiores de substituição do ligante originaram resistências superiores às argamassas com percentagens mais baixas e superiores também à argamassa de referência. Em todos os casos, as argamassas apenas com pó de resíduo demonstraram um aumento das resistências ao longo do tempo.

Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade foi determinada segundo as indicações da norma EN 15801:2009. Na Figura 4 apresentam-se os resultados obtidos para o coeficiente de capilaridade, que traduz a velocidade de absorção de água numa fase inicial, para os 60 dias e 120 dias de cura, e os desvios-padrão obtidos para cada amostra.

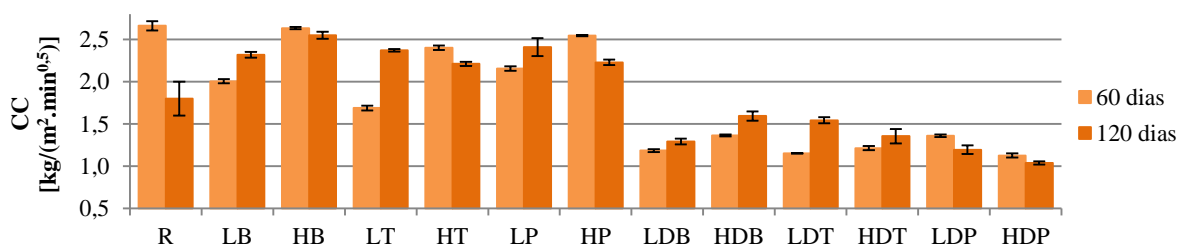


Figura 4: Coeficiente de capilaridade (CC) aos 60 dias e aos 120 dias

Pela análise do gráfico obtido, verificou-se que as argamassas com resíduo na forma integral apresentam coeficientes de absorção por capilaridade mais elevados do que as argamassas apenas com resíduo na forma de pó. No caso das primeiras, as argamassas com percentagens de substituição mais elevadas revelam também uma tendência para coeficientes mais elevados. No que diz respeito à evolução ao longo do tempo, as argamassas com percentagens mais baixas de resíduo na forma integral sofreram um aumento do coeficiente de capilaridade ao longo do tempo. Esta tendência é também verificada pela generalidade das argamassas que contêm apenas pó de resíduo, com a exceção das argamassas com pó de vasos.

Índice de Secagem

O índice de secagem foi determinado com base no procedimento definido por Brito [7]. Foram utilizados os provetes resultantes do ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade após saturação. Optou-se por realizar o ensaio sem impermeabilização das faces laterais. Os provetes foram mantidos numa câmara climática, a uma temperatura e humidade relativa de $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ e $(50 \pm 5)\%$, respetivamente. Foram efetuadas pesagens consecutivas, que permitiram determinar a curva de evaporação e avaliar a capacidade de secagem das argamassas, que é tanto maior quanto menor for o respetivo índice de secagem. Na Figura 5 são apresentados os resultados obtidos para todas as argamassas, aos 60 dias e aos 120 dias e os respectivos desvios-padrão.

Verificou-se, com os resultados obtidos, que as argamassas com resíduos de cerâmica na forma integral apresentam menor capacidade de secagem que as restantes e que esta diminui com o aumento da percentagem de substituição. Apenas as argamassas com resíduos de vasos e as argamassas com elevada percentagem de substituição de telha demonstraram uma diminuição do índice de secagem e consequente aumento da velocidade de secagem. No caso das argamassas que contêm apenas resíduo em pó, os valores obtidos, mais próximos da argamassa de referência, não apresentam diferenças evidentes, nem no que respeita ao tipo de resíduo e percentagem de substituição, nem em relação ao período de cura.

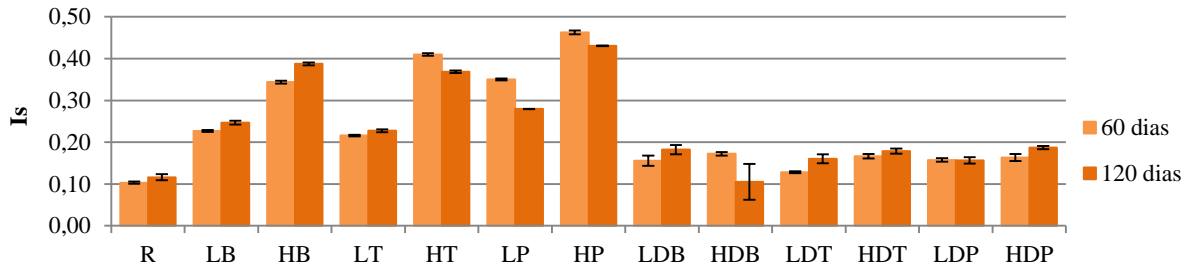
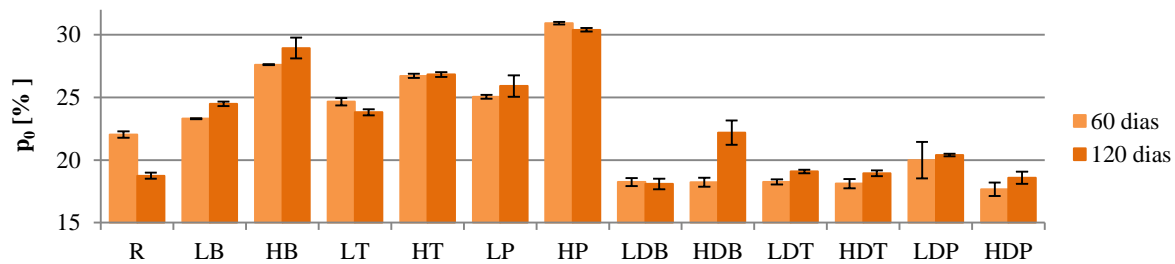


Figura 5: Índice de secagem (IS) aos 60 e aos 120 dias

Porosidade Aberta

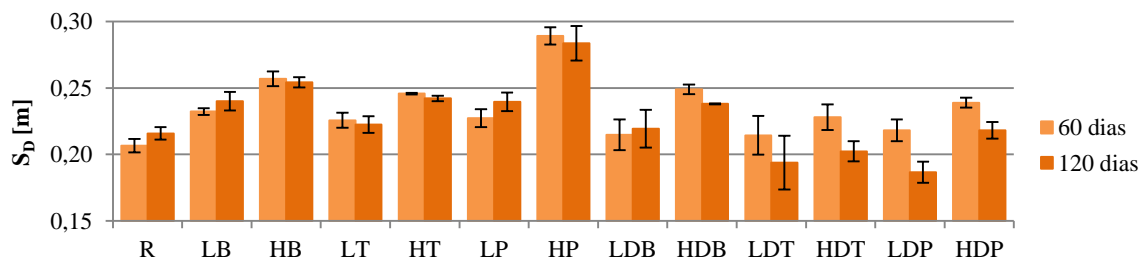
A determinação da porosidade aberta das argamassas foi efetuada de acordo com norma de ensaio NP EN 1936:2008, com algumas adaptações face ao tipo de produtos em questão e sem utilização do vácuo. Os resultados obtidos e os respectivos desvios-padrão são apresentados na Figura 6.

Verificou-se que, no que diz respeito às argamassas que contêm apenas pó de resíduo, as diferenças entre tipos de resíduos e percentagens de substituição são pouco evidentes. É possível observar, contudo, uma tendência para o aumento da porosidade aberta ao longo do tempo. Os valores obtidos para estas argamassas são claramente inferiores às argamassas com resíduos de cerâmica na forma integral. No caso das últimas, que revelam valores superiores à argamassa de referência, as argamassas com percentagens mais elevadas de substituição, apresentam porosidades superiores. Contudo, ao contrário das restantes, não apresentam uma evolução clara ao longo do tempo.


Figura 6: Porosidade aberta (p_0) aos 60 e aos 120 dias

Permeabilidade ao vapor de água

A determinação da espessura da camada de ar equivalente foi realizada de acordo com a norma de ensaio EN ISO 12572:2001 e foi selecionado o método da tina húmida. Na Figura 7 é apresentada a espessura da camada de ar equivalente, aos 60 dias e aos 120 dias, com a representação do desvio-padrão registado.


Figura 7: Espessura da camada de ar equivalente (S_D) aos 60 e aos 120 dias

Verificou-se que, no caso das argamassas com resíduo integral, as argamassas com percentagens superiores de substituição (H) apresentam resistências ao vapor superiores, que, no entanto, ao contrário das restantes, tendem a diminuir ao longo do tempo. No caso das argamassas apenas com pó de resíduo (D), que apresentam permeabilidades tendencialmente superiores às argamassas com resíduo integral, é bastante evidente o aumento da permeabilidade ao longo do tempo. Estas argamassas apresentam também variabilidades superiores nos resultados individuais, expressos pelas barras do desvio padrão representadas. A argamassa que apresenta uma maior resistência ao vapor será a argamassa com elevada percentagem de resíduo integral de vasos. No geral, as argamassas com menores resistências são as que contêm apenas a fase fina de resíduos (D).

3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

De forma a avaliar os resultados obtidos integrando os mesmos nos requisitos para a reabilitação de edifícios antigos, recorreu-se a alguma bibliografia existente. Veiga et al. [8] apresentam algumas características fundamentais para argamassas de reparação de edifícios antigos. Na Tabela 3 é apresentado um resumo das características consideradas pelos autores como mais relevantes e os valores mais adequados face à investigação levada a cabo.

Tabela 3 – Características fundamentais para argamassas de reparação de edifícios antigos (com base em [8])

Tipo de argamassa	Características mecânicas aos 90 dias			Comportamento à água	
	Rt (N/mm ²)	Rc (N/mm ²)	E (N/mm ²)	Sd (m)	C (kg/m ² /min ^{1/2})
Reboco exterior	[0.2 : 0.7]	[0.4 : 2.5]	[2000 : 5000]	< 0.08	[1.0 : 1.5]
Reboco interior	[0.2 : 0.7]	[0.4 : 2.5]	[2000 : 5000]	< 0.10	-
Juntas	[0.4 : 0.8]	[0.6 : 3.0]	[3000 : 6000]	< 0.10	[1.0 : 1.5]

C, coeficiente de capilaridade; E, modulo de elasticidade; Rc, resistência à compressão; Rt, resistência à flexão; Sd, espessura da camada de ar de difusão equivalente.

Relativamente às características mecânicas, verifica-se que as argamassas com resíduo na forma integral e com percentagens mais elevadas de substituição são as que melhor se adequam aos intervalos definidos.

No que diz respeito ao comportamento face à presença de água, em termos de espessura da camada de ar equivalente, verifica-se que nenhuma das argamassas estudadas apresenta valores inferiores ao máximo definido. Contudo, as argamassas com resíduo apenas na forma de pó estão relativamente próximas desse valor. Os valores obtidos para o coeficiente de capilaridade pelas argamassas com substituição do ligante por pó de resíduo apresentam, na generalidade, valores dentro do intervalo definido. As restantes argamassas apresentam valores ligeiramente superiores.

Dos valores obtidos nos restantes parâmetros, para a absorção de água por capilaridade verificou-se que as argamassas com substituição de ligante apresentaram resultados bastante satisfatórios, na medida em que não agravaram face à argamassa de referência e, nalguns casos, o aumento da percentagem de substituição originou uma melhoria no seu desempenho. Do mesmo modo, o índice de secagem obtido para estas argamassas foi mais baixo que o das restantes, o que significa que estas, para além de terem uma taxa de absorção de água inicial mais baixa, possuem também uma facilidade de secagem superior às restantes. Nestes casos, os valores obtidos foram mais favoráveis do que os obtidos para a argamassa de referência. Paralelamente, a porosidade aberta das argamassas apenas com resíduo em pó é inferior à porosidade das argamassas com resíduos na forma integral. Este facto poderá, eventualmente, dever-se a uma quantidade reduzida de poros de pequenas dimensões que conduz a absorções mais baixas e perdas de humidade por secagem mais rápidas.

4. CONCLUSÕES

No geral, todas as argamassas estudadas, apesar de, em parte, não se encontrarem dentro dos intervalos definidos como mais adequados para edifícios antigos na bibliografia analisada, obtiveram valores relativamente próximos. Com ajustes das proporções, quer de resíduo integral, quer de ligante, ou com outra areia, será bastante provável obter valores dentro dos considerados como mais adequados. Deverá, contudo, salvaguardar-se que as metodologias utilizadas para definir os valores tidos como ideais poderão diferir em alguns aspectos das utilizadas neste estudo. Por outro lado, o facto de estarem a ser comparados valores de ensaio aos 90 dias poderão indiciar ligeiras discrepâncias, sobretudo no que concerne às resistências mecânicas que, no caso das argamassas de cal aérea, tenderão a aumentar com o período de cura.

Quanto aos restantes parâmetros determinados, os valores obtidos foram bastante aceitáveis e permitiram, de certo modo, averiguar qual o impacto das percentagens de substituição, quer de ligante, quer do agregado, bem como do tipo de resíduo utilizado. Foi também possível aferir a evolução dos parâmetros ao longo do tempo.

5. AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem à FCT-Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo apoio atribuído ao projecto EXPL/ECM-COM/0928/2012-Incorporação de resíduos de cerâmica em argamassas de reabilitação.

Este trabalho é enquadrado na Iniciativa Energia para a Sustentabilidade da Universidade de Coimbra e apoiado pelo projeto Energy and Mobility for Sustainable Regions - EMSURE (CENTRO-07-0224-FEDER-002004).

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Moropoulou, A., Bakolas, A., Anagnostopoulou, S. *Composite materials in ancient structures*. Cement & Concrete Composites. Vol. 27: 295–300 (2005).
- [2] Baronio, G., Binda, L., Lombardini, N. *The role of brick pebbles and dust in conglomerates based on hydrated lime and crushed bricks*. Constr Build Mater; Vol. 11: 33-40 (1997).
- [3] Velosa, A.L., Coroado, J., Veiga, M.R., Rocha, F. *Characterisation of roman mortars from Conímbriga with respect to their repair*. Materials Characterization; Vol. 58: 1208–1216 (2007).
- [4] Böke, H., Akkurt, E., İpekoğlu, B., Uğurluet, E. *Characteristics of brick used as aggregate in historic brick-lime mortars and plasters*. Cem Concr Res; Vol. 36: 1115–1122 (2006).
- [5] Andrade I. *Produção de resíduos na indústria cerâmica – Região Centro 2003*. Região Centro: CCDRC (2004).
- [6] Faria-Rodrigues, P. e Henriques, F. *Current mortars in conservation: an overview*. Int. J. for Restoration Vol. 10:6; 609-622 (2004).
- [7] Brito, V., Gonçalves, T., Faria-Rodrigues, P. *Coatings applied on damp building substrates: performance and influence on moisture transport*. J. Coat. Technol. Research. ISSN: 1547-0091.8:4 (2010) 513-525. 10.1007/s11998-010-9319-5.
- [8] Veiga, M., Fragata, A., Velosa, A., Magalhães, A. e Margalha, G. *Lime-based mortars: viability for use as substitution renders in historical buildings*. International Journal of Architectural Heritage, Vol. 4: 177–195 (2010).